

(19) RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
INSTITUT NATIONAL
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE
PARIS

(11) N° de publication : 2 814 810
(à n'utiliser que pour les commandes de reproduction)
(21) N° d'enregistrement national : 00 12430
(51) Int Cl⁷ : G 01 N 21/41, G 02 B 5/18, 5/20

(12) DEMANDE DE BREVET D'INVENTION A1

(22) Date de dépôt : 29.09.00.

(30) Priorité :

(43) Date de mise à la disposition du public de la demande : 05.04.02 Bulletin 02/14.

(56) Liste des documents cités dans le rapport de recherche préliminaire : Se reporter à la fin du présent fascicule

(60) Références à d'autres documents nationaux apparentés :

(71) Demandeur(s) : COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE Etablissement de caractère scientifique technique et industriel — FR.

(72) Inventeur(s) : LAFFONT GUILLAUME et FERNAND PIERRE.

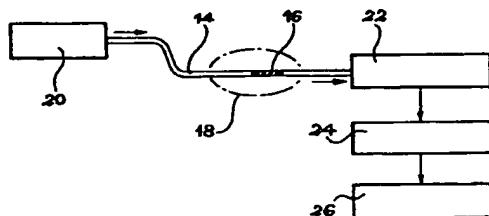
(73) Titulaire(s) :

(74) Mandataire(s) : BREVATOME.

(54) REFRACTOMETRE A RESEAUX DE BRAGG A TRAITS INCLINES.

(57) Réfractomètre à réseaux de Bragg à traits inclinés.

Pour mesurer l'indice de réfraction d'un milieu (18), par exemple un liquide ou un gaz, ce système comprend un guide d'onde (14) comportant un réseau de Bragg à traits inclinés (16) dont la réponse spectrale dépend de l'indice de réfraction du milieu, une source de lumière (20) pour faire interagir cette lumière avec le réseau, des moyens (22) d'analyse spectrale de la lumière ayant interagi avec le réseau, des moyens (24) de récupération du spectre fourni par les moyens d'analyse spectrale et des moyens (26) pour corrélér, à partir du spectre récupéré, la réponse spectrale du réseau à une valeur de l'indice de réfraction du milieu.



FR 2 814 810 - A1



RÉFRACTOMÈTRE À RÉSEAUX DE BRAGG À TRAITS INCLINÉS**DESCRIPTION****DOMAINE TECHNIQUE**

5 La présente invention concerne un réfractomètre c'est-à-dire un système de mesure d'indices de réfraction.

10 Elle s'applique notamment à la mesure de l'indice de réfraction d'un liquide ou d'un gaz ou de tout autre produit ou composé chimique qui est en contact avec un guide d'onde, en particulier déposé sur ce guide d'onde. Ce dernier peut être par exemple une fibre optique.

15 Le réfractomètre comprend un ou une pluralité de transducteurs à réseau de Bragg (« Bragg grating ») formés sur un tel guide d'onde.

ETAT DE LA TECHNIQUE ANTERIEURE

20 Un réseau de Bragg, photo-inscrit dans une fibre optique, est une structure périodique formée par une modulation de l'indice de réfraction du cœur (« core ») de la fibre.

25 Cette structure se comporte pratiquement comme un miroir pour une bande spectrale très fine autour d'une longueur d'onde caractéristique λ_B (longueur d'onde pour laquelle il y a un accord de phase entre les multiples réflexions au sein du réseau) et reste transparente pour toutes les autres. En effet, les multiples ondes réfléchies à ces autres longueurs d'onde n'étant pas en phase, elles interfèrent 30 destructivement et sont donc transmises du fait de la conservation de l'énergie.

La longueur d'onde caractéristique, appelée « longueur d'onde de Bragg », est définie par la relation $\lambda_B=2 \cdot n_{eff} \cdot \Lambda$ où Λ est le pas (« pitch ») du réseau de Bragg (de l'ordre de 0,5 μm pour un réseau standard) et n_{eff} l'indice effectif du mode guidé fondamental incident sur le réseau.

Les réseaux de Bragg à longue période ou LPFG (« Long Period Fiber bragg Gratings ») sont également formés par une modulation périodique de l'indice de réfraction du cœur d'une fibre optique généralement monomode. Mais la valeur de la période Λ de cette modulation est alors typiquement supérieure à 100 μm .

Quand on injecte la lumière d'une source à large bande dans une fibre contenant un tel réseau, on observe un certain nombre de bandes de résonance, de largeurs à mi-hauteur bien supérieures à celle d'un réseau de Bragg classique (plusieurs nanomètres au lieu de quelques centaines de picomètres). Chacune de ces bandes de résonance correspond à un couplage entre l'onde lumineuse guidée incidente sur le réseau et un mode appelé « mode de gaine » (« cladding mode ») qui est co-propagatif (on dit aussi co-directif), ce mode se propageant dans la même direction que l'onde incidente.

L'énergie contenue dans ces modes décroît rapidement au cours de la propagation dans la fibre, du fait des pertes élevées à l'interface entre la gaine optique et le revêtement protecteur de cette fibre.

Le couplage ayant lieu vers des modes co-directifs, les bandes de résonances n'apparaissent que sous la forme de bandes d'absorption sur le spectre en

transmission de sorte qu'aucune énergie n'est observée en réflexion.

5 Les longueurs d'onde pour lesquelles se produit le phénomène de couplage vers les modes de gaine dépendent de la période Λ du réseau à longue période, de l'amplitude de la modulation photo-induite, notée Δn , et des caractéristiques opto-géométriques de la fibre optique. Elles sont données par la condition dite d'accord de phase qui suit :

$$10 \quad \beta_{01} - \beta_{\text{gaine}} = \frac{2\pi}{\Lambda} \quad (1)$$

15 où β_{01} et β_{gaine} représentent respectivement les constantes de propagation du mode guidé fondamental et d'un mode de gaine. Cette relation peut être réécrite en faisant intervenir les indices effectifs des modes :

$$\frac{2\pi}{\lambda_{\text{rés}}} \cdot n_{01}^{\text{eff}} - \frac{2\pi}{\lambda_{\text{rés}}} \cdot n_{\text{gaine}}^{\text{eff}} = \frac{2\pi}{\Lambda} \quad (2)$$

$$17 \quad \lambda_{\text{rés}} = (n_{01}^{\text{eff}} - n_{\text{gaine}}^{\text{eff}}) \cdot \Lambda \quad (3)$$

où $\lambda_{\text{rés}}$ désigne la longueur d'onde centrale de la bande de résonance.

20 Les réseaux de Bragg appelés « réseaux à traits inclinés » (« blazed, tilted or slanted fiber Bragg gratings ») résultent d'une modulation d'indice photo-induite dont la période est aussi de l'ordre de 0,5 μm . Cependant, cette modulation présente la 25 spécificité d'être inclinée, par rapport à l'axe longitudinal de la fibre optique, d'un angle θ que l'on appelle « angle de blaze ».

Cette périodicité et l'inclinaison de la modulation d'indice constituent les deux paramètres-clés permettant d'expliquer la réponse spectrale très particulière de ces composants et les différences 5 importantes entre ces derniers et les réseaux de Bragg classiques ainsi que les réseaux de Bragg à longue période.

La figure 1 représente schématiquement un réseau de Bragg à traits inclinés 2 inscrit dans le 10 cœur 4 d'une fibre optique 6 dont la gaine (« cladding ») optique a la référence 7. Un mode guidé 8 incident sur le réseau peut être couplé soit vers un ensemble discret de modes de gaine 10 qui sont contra-propagatifs, soit vers ce que l'on appelle un continuum 15 de modes radiatifs 12 soit à la fois vers ces modes de gaine et ce continuum de modes radiatifs.

La discrétisation du couplage vers les modes de gaine contra-propagatifs est conditionnée par les dimensions transverses finies de la gaine de la 20 fibre optique. Du point de vue spectral, il en résulte une succession de bandes de résonance qui ont des largeurs à mi-hauteur similaires à celles d'un réseau de Bragg standard (environ 200 pm de largeur à mi-hauteur) et sont typiquement espacées d'environ un 25 nanomètre.

Ces bandes de résonance sont présentes sur une plage spectrale étroite (quelques dizaines de nanomètres) qui dépend de l'angle de blaze et des caractéristiques opto-géométriques de la fibre et du 30 réseau (période et amplitude de modulation). Le couplage vers les modes radiatifs ne peut avoir lieu que si la gaine de la fibre optique est très grande devant la longueur d'onde.

Cette configuration peut être simulée en utilisant un liquide adaptateur d'indice que l'on dépose autour de la fibre et dont l'indice de réfraction est à peu près identique à celui de la gaine optique.

La figure 2 montre un spectre de transmission d'un réseau de Bragg à traits inclinés qui a une longueur de 8 mm et un angle de blaze de 16°, lorsque ce réseau est dans l'air d'indice de réfraction n_{ext} égal à 1,0 (courbe I) et lorsqu'il est dans un liquide adaptateur d'indice pour lequel n_{ext} vaut 1,43 à 1550 nm (courbe II). On a porté en abscisses la longueur d'onde λ (en nm) et en ordonnées la transmission normalisée TN. Dans le cas du couplage vers les modes de gaine, on observe principalement un couplage vers les familles de modes dites LP_{0n} et LP_{1n} .

Pour les réseaux à traits inclinés, la condition d'accord de phase donnant la valeur des différentes longueurs d'ondes de résonance est de la forme :

$$\lambda_{rés} = (n_{01}^{eff} + n_{gaine}^{eff}) \cdot \frac{\Lambda}{\cos \theta} \quad (4)$$

où $\lambda_{rés}$ désigne une longueur d'onde de résonance, Λ la période de la modulation, θ l'angle de blaze, n_{01}^{eff} et n_{gaine}^{eff} respectivement l'indice effectif du mode guidé et l'indice effectif d'un mode de gaine. Le signe + provient du fait que l'on travaille avec des modes contra-propagatifs et non pas des modes co-directifs.

On considère ci-après des capteurs à fibre optique (CFO) intrinsèques, capteurs pour lesquels une ou plusieurs propriétés optiques de la fibre dépendent

directement, par exemple, de phénomènes chimiques et/ou biochimiques que l'on cherche à déterminer. La fibre optique constitue alors l'élément transducteur du capteur.

5 On connaît en particulier des capteurs intrinsèques à ondes évanescentes ainsi que des capteurs à plasmons de surface.

On connaît aussi des dispositifs utilisant des réseaux de Bragg standard qui sont photo-inscrits
10 dans des fibres optiques monomodes en vue d'applications à la réfractométrie.

On connaît en outre des systèmes de réfractométrie qui utilisent des réseaux de Bragg à longue période. Pour de tels réseaux, la longueur
15 d'onde de résonance associée à un mode de gaine donné dépend de l'indice de réfraction du milieu qui est situé au-delà de la gaine optique de la fibre dans laquelle sont formés ces réseaux. Tout changement de cet indice de réfraction se traduit par un décalage de
20 la longueur d'onde de résonance.

Les capteurs ou systèmes connus, mentionnés plus haut, présentent des inconvénients.

En ce qui concerne les capteurs à ondes évanescentes, on note essentiellement :

25 le vieillissement et la détérioration de la partie sensible de tels capteurs, par exemple formée par l'agent médiateur que l'on dépose sur la fibre optique de ces capteurs, ce qui oblige à de fréquents recalibrages de ces derniers
30 la difficulté de mettre au point des méthodes de compensation de la dégradation des performances de ces capteurs

la mesure d'intensité sur laquelle est fondée l'utilisation de ceux-ci et qui est donc sensible à toute fluctuation d'intensité de la source lumineuse associée ainsi qu'à une modification des 5 conditions d'injection de la lumière dans la fibre, d'où une détérioration de la résolution et de la précision des mesures, et la nécessité d'enlever mécaniquement ou chimiquement la gaine de la fibre optique pour 10 avoir suffisamment accès au champ évanescence, ce qui constitue une opération complexe, délicate à maîtriser et fragilisant la fibre optique.

Parmi les inconvénients des capteurs à plasmons de surface, citons : 15 la difficulté de former des systèmes totalement fibrés et miniaturisés car les systèmes utilisant de tels capteurs mettent généralement en œuvre des composants massifs autour d'une architecture difficile à convertir en un système industriel, et 20 la nécessité de contrôler parfaitement le profil (essentiellement l'épaisseur) de la couche métallique utilisée dans de tels capteurs ainsi que l'accrochage de cette couche.

Parmi les inconvénients des dispositifs 25 utilisant des réseaux de Bragg standard, on retrouve des problèmes similaires à ceux que posent les capteurs à ondes évanescentes :

nécessité d'attaquer chimiquement ou mécaniquement 30 la gaine de la fibre optique au niveau du réseau de Bragg de mesure problème de sélectivité car le pic de Bragg est sensible à d'autres paramètres que l'indice du milieu extérieur (par exemple la température et les

contraintes), ce qui nécessite d'utiliser des techniques de compensation et de correction mettant par exemple en œuvre des capteurs de référence relative fragilité de la tête de mesure finale 5 difficulté de réalisation du transducteur, nécessitant d'attaquer la gaine optique, et sensibilité relativement faible.

En ce qui concerne les systèmes de réfractométrie utilisant les réseaux de Bragg à longue 10 période, les principaux inconvénients sont les suivants :

grande sensibilité de la résonance d'un réseau à longue période vis-à-vis d'autres paramètres que l'indice de réfraction (par exemple la température 15 et les déformations), d'où la nécessité d'utiliser des techniques de compensation et de correction forte non-linéarité de la sensibilité du transducteur capacités de multiplexage extrêmement limitées car 20 un capteur très sensible monopolise une plage spectrale importante, au moins égale à 100 nm, et grande largeur de la bande de résonance, rendant délicate la détermination précise du sommet de celle-ci.

25 EXPOSÉ DE L'INVENTION

La présente invention a pour but de remédier aux inconvénients précédents.

Elle a pour objet un système de mesure de l'indice de réfraction d'au moins un milieu, ce système 30 étant caractérisé en ce qu'il comprend :

un guide d'onde comportant au moins un transducteur formé, dans une partie du guide d'onde mise en

contact avec le milieu, par un réseau de Bragg à traits inclinés dont la réponse spectrale dépend de l'indice de réfraction du milieu par le biais d'un couplage énergétique entre le mode guidé et des modes de gaine et/ou un continuum de modes radiatifs,

une source de lumière optiquement couplée au guide d'onde pour y envoyer cette lumière et la faire interagir avec le réseau,

10 des moyens d'analyse spectrale prévus pour analyser la lumière ayant interagi avec le réseau et fournir un spectre correspondant à ce réseau,
des moyens d'acquisition prévus pour récupérer ce spectre et

15 des moyens de traitement électronique prévus pour corréler, à partir du spectre ainsi récupéré, la réponse spectrale du réseau à une valeur de l'indice de réfraction du milieu et fournir cette valeur.

20 Selon un premier mode de réalisation préféré du système objet de l'invention, les moyens de traitement électronique sont prévus pour déterminer les courbes enveloppes inférieure et supérieure du spectre normalisé et l'aire normalisée comprise entre ces deux courbes.

25 Le guide d'onde, par exemple une fibre optique, peut comporter un seul réseau de Bragg à traits inclinés ou, au contraire, une pluralité de tels réseaux. Dans ce dernier cas, les moyens d'analyse 30 spectrale sont prévus pour analyser la lumière ayant interagi avec les réseaux et fournir les spectres correspondant respectivement à ces réseaux, les moyens d'acquisition sont prévus pour démultiplexer de façon

optique ou numérique les spectres ainsi fournis et discriminer les réponses spectrales respectives des réseaux et les moyens de traitement électronique sont prévus pour corréler la réponse spectrale de chaque 5 réseau à la valeur de l'indice de réfraction du milieu correspondant à ce réseau.

Dans tous les cas, la source de lumière peut être une source à large bande. Cependant, on peut également utiliser une source à spectre étroit, 10 accordable en longueur d'onde, et les moyens d'analyse spectrale peuvent alors comprendre un simple photodétecteur.

Selon un premier mode de réalisation particulier du système objet de l'invention, la source 15 de lumière est optiquement couplée à une première extrémité du guide d'onde et les moyens d'analyse spectrale sont optiquement couplés à une deuxième extrémité de ce guide d'onde, en vue de faire des mesures d'indice de réfraction par transmission.

20 Selon un deuxième mode de réalisation particulier, la source de lumière et les moyens d'analyse spectrale sont optiquement couplés à une première extrémité du guide d'onde et des moyens de réflexion de la lumière sont prévus à la deuxième 25 extrémité du guide d'onde, en vue de faire des mesures d'indice de réfraction par réflexion.

BRÈVE DESCRIPTION DES DESSINS

La présente invention sera mieux comprise à la 30 lecture de la description d'exemples de réalisation donnés ci-après, à titre purement indicatif et nullement limitatif, en faisant référence aux dessins annexés sur lesquels :

la figure 1 est une vue schématique d'un réseau de Bragg à traits inclinés et a déjà été décrite,
la figure 2 montre un spectre en transmission d'un réseau de Bragg à traits inclinés et a déjà été
5 décrite, et
les figures 3 à 6 sont des vues schématiques de divers modes de réalisation particuliers du système de mesure d'indices de réfraction objet de l'invention.

10 **EXPOSÉ DÉTAILLÉ DE MODES DE RÉALISATION PARTICULIERS**

Considérons d'abord les transducteurs utilisés dans la présente invention pour réaliser des mesures d'indices de réfraction, à savoir les réseaux de Bragg à traits inclinés, par exemple photo-inscrits
15 dans le cœur de fibres optiques, et commençons par étudier la sensibilité spectrale d'un tel réseau à toute modification de l'indice de réfraction d'un milieu extérieur avec lequel le guide d'onde comportant ce réseau est en contact.

20 Considérons donc une fibre optique, ou tout autre guide d'onde, dans lequel a été inscrit un réseau de Bragg à traits inclinés. Ce réseau peut avoir été formé selon l'une quelconque des méthodes de photo-inscription connues, par exemple les techniques dites à
25 masque de phase ou à miroir de Lloyd.

Dans la suite de la présente description, les valeurs numériques ne sont données qu'à titre illustratif et ne sont en aucun cas limitatives. Elles concernent une fibre optique monomode présentant les
30 caractéristiques suivantes : indices de cœur et de gaine valant respectivement 1,462 et 1,457 à 1550 nm,

rayons de cœur et de gaine valant respectivement 4,125 μm et 62,5 μm .

5 Lorsque de la lumière est injectée dans un tel guide d'onde, elle interagit avec le réseau à traits inclinés. Elle est alors couplée vers un certain nombre de modes de gaine. Ce couplage n'a lieu que pour des longueurs d'ondes incidentes qui vérifient une condition dite d'accord de phase entre le mode guidé et l'un quelconque des modes de gaine.

10 Cette condition n'est vérifiée que pour un nombre discret de longueurs d'ondes, ce qui se traduit par l'existence de bandes de résonances discrètes.

15 La localisation et l'amplitude de ces différentes résonances spectrales dépendent non seulement des paramètres opto-géométriques du guide (notamment indices et dimensions du cœur et de la gaine optique) mais aussi de l'indice de réfraction du milieu extérieur, milieu qui entoure la gaine optique du guide.

20 Lorsque cet indice de réfraction est modifié, les différentes bandes de résonance se décalent spectralement et changent d'amplitude.

25 Prenons le cas d'un réseau ayant un angle de blaze θ de 16°. Lorsque l'indice de réfraction n_{ext} du milieu extérieur passe de 1,0 (indice de l'air) à 1,3, les bandes de résonance spectrale se décalent vers les grandes longueurs d'ondes, en moyenne de 200 pm, et ce sans changement significatif de leur atténuation.

30 Par contre, lorsque n_{ext} va de 1,3 à 1,43, on observe un phénomène de disparition progressive des bandes de résonance en plus d'un léger décalage spectral, jusqu'à l'obtention d'un spectre de pertes parfaitement lisse et continu.

La figure 2 déjà décrite montre le spectre d'un tel réseau dans l'air ainsi que dans un milieu d'indice 1,43.

Le phénomène mentionné ci-dessus peut être 5 expliqué de la façon suivante. A chaque longueur d'onde de résonance λ_i , on peut associer un mode de gaine d'indice effectif $n_{eff,i}$ qui décroît avec λ_i .

Lorsque l'indice de réfraction du milieu extérieur croît jusqu'à atteindre la valeur $n_{eff,i}$, le 10 mode de gaine est progressivement de moins en moins guidé du fait de la diminution de l'intégrale de recouvrement entre le mode de cœur guidé et ce mode de gaine. Il en résulte une réduction de l'amplitude de la bande de résonance correspondante.

15 Quand n_{ext} est égal à $n_{eff,i}$ le mode de gaine n'est plus guidé ; le couplage a désormais lieu avec le continuum des modes radiatifs.

Dans la présente invention, pour tirer profit de ce phénomène, on utilise une technique 20 d'analyse qui consiste à déterminer l'enveloppe inférieure ϵ_{inf} du spectre normalisé de pertes du réseau de Bragg à traits inclinés transducteur (passant par les maxima du spectre) et l'enveloppe supérieure ϵ_{sup} de ce même spectre (passant par les minima du spectre) 25 puis l'aire normalisée A comprise entre ces deux enveloppes.

La détermination des enveloppes passe, par exemple, par la détermination des pieds et des sommets des différentes bandes de résonances ou, ce qui est 30 équivalent, par la détermination des minima et maxima du spectre de transmission.

La localisation de ces minima et maxima peut être réalisée selon une méthode directe de détection d'extrêma ou utiliser une opération de dérivation, conduisant à une courbe dérivée, puis une 5 détection des zéros de cette courbe. Finalement, l'enveloppe inférieure est obtenue par interpolation de l'ensemble des maxima, par exemple à l'aide de fonctions splines.

10 L'enveloppe supérieure est aussi obtenue par interpolation, à l'aide de telles fonctions, de l'ensemble des minima.

Au lieu de mesurer la variation de l'indice de réfraction du milieu extérieur sous la forme d'un décalage en longueur d'onde d'une bande de résonance, 15 on suit l'évolution de l'aire normalisée A qui est définie de la façon suivante :

$$A = \frac{\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} [\epsilon_{\text{sup}}(\lambda) - \epsilon_{\text{inf}}(\lambda)] d\lambda}{\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} [\epsilon_{\text{sup}}^{\text{n}_{\text{ref}}}(\lambda) - \epsilon_{\text{inf}}^{\text{n}_{\text{ref}}}(\lambda)] d\lambda} \quad (5)$$

où $\epsilon_{\text{sup}}(\lambda)$ et $\epsilon_{\text{inf}}(\lambda)$ sont respectivement les enveloppes supérieure et inférieure du spectre normalisé de pertes 20 du réseau de Bragg à traits inclinés transducteur, λ_{\min} et λ_{\max} sont les limites de la fenêtre spectrale comportant toutes les résonances spectrales du réseau (ici respectivement 1495 nm et 1575 nm). $\epsilon_{\text{sup}}^{\text{n}_{\text{ref}}}$ et $\epsilon_{\text{inf}}^{\text{n}_{\text{ref}}}$ sont deux enveloppes que l'on prend comme référence et 25 qui correspondent au spectre du réseau à traits inclinés placé dans un milieu extérieur d'indice de réfraction en-deçà duquel seul un décalage spectral est observable (ici, $n_{\text{ref}} = n_{\text{ext}} = 1,296$).

Lorsque l'indice de réfraction du milieu extérieur augmente au-delà de 1,3, le lissage progressif du spectre est équivalent à un rapprochement progressif des deux enveloppes et, par conséquent, à 5 une diminution de l'aire normalisée A.

L'intérêt de la définition ci-dessus de A est de rendre la mesure indépendante de toute fluctuation en intensité de la source qui émet la lumière injectée dans le guide d'onde. Ceci est 10 important pour toute application industrielle de l'invention.

Précisons que la résolution et la répétabilité des mesures réalisées avec les réseaux de Bragg à traits inclinés et la technique d'analyse 15 décrite plus haut valent environ 10^{-5} .

Dans l'invention, on utilise donc au moins un réseau de Bragg à traits inclinés pour mesurer l'indice de réfraction n_{ext} d'un milieu en contact avec la fibre optique dans laquelle ce réseau est photo-inscrit. La sensibilité d'un tel réseau à l'indice de réfraction du milieu se traduit par un lissage progressif de l'ensemble des bandes de résonance présentes dans le spectre en transmission lorsque n_{ext} augmente. La méthode d'analyse de ce spectre peut 20 consister à suivre l'évolution de l'aire comprise entre l'enveloppe passant par les minima des bandes de résonance et l'enveloppe passant par les maxima de ces bandes. Il est ainsi possible de réaliser des mesures avec une résolution et une répétabilité de l'ordre de 25 10^{-5} . Par ailleurs, on peut adapter la dynamique de mesures en jouant sur l'angle de blaze θ . Une valeur de 30 l'ordre de 16° pour ce dernier permet de couvrir la

plage d'indice de réfraction allant de 1,32 à 1,42 (valeurs données pour une longueur d'onde de 1550 nm).

Dans ce qui précède, on a utilisé les spectres en transmission des réseaux à traits inclinés 5 pour faire de la réfractométrie. En fait, il est possible de travailler en réflexion. Pour ce faire, on dispose, en bout de fibre, un miroir renvoyant la lumière en sens inverse.

Dans ce cas, la lumière qui se propage dans 10 le cœur de la fibre interagit deux fois avec le réseau transducteur. Le spectre résultant, que l'on peut observer en entrée grâce à un coupleur optique, correspond simplement au spectre en transmission élevé au carré.

15 La méthode d'analyse expliquée plus haut pour un travail en transmission est strictement identique dans le cas d'un travail en réflexion, si ce n'est que tous les traitements se font sur le spectre en transmission élevé au carré.

20 On considère maintenant des exemples d'un système de mesure d'indice de réfraction conforme à l'invention qui utilise au moins un réseau de Bragg à traits incliné fonctionnant en transmission. Il est nécessaire d'obtenir les spectres de ce réseau 25 transducteur. Étant donné la largeur des bandes de résonance et leur espacement spectral, il est donc nécessaire d'obtenir ces spectres avec une résolution suffisante si l'on veut optimiser la résolution des mesures d'indice de réfraction.

30 Pour pouvoir détecter des variations d'indice de l'ordre de 10^{-5} , il faut acquérir les spectres avec des pas de longueur d'onde de l'ordre de 10 picomètres. Avec des spectres moins résolus (par

exemple avec des pas de plusieurs dizaines de picomètres) la résolution des mesures serait moins bonne.

5 Précisons que la plage spectrale que l'on cherche à analyser peut aller de quelques nanomètres à plusieurs dizaines de nanomètres. Cela dépend essentiellement de la dynamique de mesure que l'on souhaite obtenir.

10 Un premier exemple du système de mesure d'indice de réfraction objet de l'invention est schématiquement représenté sur la figure 3 et comprend une fibre optique 14 sur laquelle est formée un réseau de Bragg à traits inclinés 16 constituant un transducteur.

15 La gaine protectrice de la fibre n'est pas représentée mais a été enlevée sur la portion de fibre où est formé le réseau 16. Cette portion de fibre est placée dans le milieu dont on veut mesurer l'indice de réfraction et qui est symbolisé par la courbe 18.

20 Le système comprend aussi une source optique 20 à large spectre, dont la lumière est injectée dans une extrémité de la fibre optique. Cette source peut être fibrée ou non. Lorsqu'elle ne l'est pas, on prévoit un moyen d'injection de la lumière dans 25 la fibre.

A l'autre extrémité de cette dernière on connecte un analyseur de spectre 22 en accord avec la plage spectrale couverte par la source 20 et le réseau transducteur 16.

30 Cet analyseur de spectre 22 est relié à un dispositif d'acquisition numérique 24 destiné à convertir les signaux analogiques fournis par l'analyseur de spectre en signaux numériques

exploitables par un dispositif de traitement électronique 26 (ordinateur).

La technique d'analyse décrite précédemment est implantée (sous la forme d'un logiciel) dans le 5 dispositif de traitement électronique 26 qui est en outre muni de moyens (non représentés) d'affichage des résultats fournis par l'ordinateur.

Un autre exemple du système objet de l'invention est schématiquement illustré par la figure 10 4. Dans cet autre exemple, on remplace la source à large spectre 20 par une source laser 28 à spectre très étroit, qui est spectralement accordable.

Dans ce cas, il n'est plus nécessaire de disposer à la sortie de la fibre 14 un analyseur 15 spectral : on se contente d'un simple photodétecteur 30.

On met encore en œuvre la technique d'analyse mentionnée plus haut, au moyen d'un dispositif d'acquisition 32 relié au photodétecteur 30 et d'un ordinateur 34 relié au dispositif 32 et prévu pour mettre en œuvre la technique d'analyse de la réponse des réseaux à traits inclinés à l'indice de réfraction du milieu extérieur.

Un autre exemple du système objet de 25 l'invention est schématiquement illustré par la figure 5. Contrairement aux systèmes des figures 3 et 4 où l'on travaille en transmission, dans le système de la figure 5 on travaille en réflexion. Pour ce faire, un miroir 36 est disposé à l'une des extrémités de la 30 fibre 14.

De façon avantageuse, ce miroir 36 est obtenu par un dépôt métallique ou diélectrique en cette

extrémité. Les caractéristiques de ce dépôt dépendent du domaine spectral dans lequel on travaille.

Un coupleur optique 38 du genre 1x2 est connecté à l'autre extrémité de la fibre 14 et, comme 5 on le voit, relié par une fibre optique 40 à la source lumineuse 20 à large spectre et, par une autre fibre optique 42, à un ensemble de traitement de signaux lumineux comprenant successivement un analyseur de spectre 44, un dispositif d'acquisition 46 et un 10 ordinateur 48.

La lumière émise par la source 20 traverse successivement la fibre 40, le coupleur 38 et la fibre 14, se réfléchit sur le miroir 36, retraverse la fibre 14 puis passe dans la fibre 42 après avoir traversé le 15 coupleur 38.

L'analyseur de spectre 44, le dispositif d'acquisition 46 et l'ordinateur 48 coopèrent pour fournir les mesures de l'indice de réfraction du milieu 18 entourant la portion de fibre qui contient le réseau 20 16 en tenant compte du fait que l'on travaille dans ce cas en réflexion.

L'homme du métier peut adapter l'exemple de la figure 5 au cas où l'on utilise la source laser 28 à spectre très étroit et spectralement accordable de la 25 figure 4 au lieu de la source 20 à large spectre.

Les exemples des figures 3 à 5 ne comprennent qu'un seul réseau transducteur. La figure 6 illustre schématiquement un autre système conforme à l'invention, fonctionnant en transmission, dans lequel 30 une pluralité de réseaux transducteurs à traits inclinés, par exemple N réseaux R1, R2, ..., RN sont respectivement formés dans des portions d'une même fibre optique 50. Ces portions sont privées de gaine

protectrice et respectivement placées dans des milieux M₁, M₂, ... M_N dont on veut connaître les indices de réfraction respectifs.

La source lumineuse 20 à large spectre est 5 encore utilisée dans l'exemple de la figure 6 et l'on injecte sa lumière dans la fibre 50.

Une telle configuration correspond à un système multiplexé. A chaque réseau transducteur R_i est alloué un domaine spectral $\Delta\lambda_i$ (1≤i≤n) ou canal, qui 10 lui est propre. On démultiplexe (par une méthode électronique, optique ou purement numérique) ces différents canaux et l'on détermine l'indice de réfraction du milieu entourant chacun des réseaux.

Pour ce faire, dans l'exemple de la figure 15 6, on relie encore la fibre 50 à un analyseur de spectre 52 prévu pour acquérir le spectre en transmission de l'ensemble des réseaux transducteurs R_i.

Cet analyseur de spectre 52 est relié à un 20 dispositif d'acquisition et de démultiplexage 54 prévu pour transformer en signaux numériques les signaux analogiques fournis par l'analyseur de spectre 52 et isoler le domaine spectral correspondant à chaque réseau transducteur.

25 Ce dispositif d'acquisition et de démultiplexage 54 est relié à un ordinateur 56 qui est muni de moyens d'affichage non représentés et qui est prévu pour mettre en œuvre la technique d'analyse sur chacun des différents domaines spectraux séparés par le 30 dispositif d'acquisition et de démultiplexage 54.

A partir de l'exemple de la figure 5, l'homme du métier peut adapter l'exemple de la figure 6 à un fonctionnement en réflexion.

L'utilisation des réseaux à traits inclinés pour la réfractométrie présente les avantages suivants :

- 5 une très faible sensibilité vis-à-vis de la température et des contraintes (par exemple beaucoup plus faible que celle des réseaux à longue période)
- 10 une capacité convenable de multiplexage, un temps de réponse de l'ordre de 1 seconde, uniquement limité par le temps de calcul de l'ordinateur et non par le réseau-transducteur, la possibilité d'adapter la dynamique de mesure et la sensibilité en choisissant les paramètres du réseau, en particulier l'angle de blaze
- 15 la possibilité d'atteindre des résolutions de l'ordre de 10^{-5} et la possibilité de faire fonctionner la partie transductrice en réflexion.

Il convient en outre de noter que la technique d'analyse spectrale des réseaux à traits inclinés, expliquée plus haut, permet de s'affranchir des problèmes de fluctuation de puissance des sources de lumière ou sources optiques, de toutes les pertes accidentelles dans le capteur à réseau à traits inclinés et de la sensibilité de ce capteur, c'est-à-dire de toute la fonction de transfert en intensité du système de mesure. C'est un problème auquel sont confrontées les techniques de l'art antérieur qui sont fondées sur une mesure d'intensité. Il s'agit donc d'un avantage déterminant sur les techniques de réfractométrie par ondes évanescentes.

Par ailleurs, il n'est pas nécessaire d'attaquer, chimiquement ou mécaniquement, la structure

initiale du guide d'onde pour obtenir des sensibilités satisfaisantes. Il est en effet difficile de maîtriser la reproductibilité de tels processus qui présentent en outre le gros inconvénient de fragiliser le guide 5 d'onde.

Ce dernier point est également un avantage à porter au crédit de la présente invention par rapport aux systèmes utilisant des réseaux de Bragg standard. Ces derniers systèmes présentent en outre des 10 performances métrologiques (en particulier des résolutions) plus faibles.

Par rapport aux capteurs à plasmons de surface, l'utilisation des réseaux à traits inclinés permet une mise en oeuvre plus simple de capteurs 15 totalement fibrés. En effet, la fabrication d'un capteur à plasmons de surface dans une fibre optique nécessite de réaliser un dépôt métallique (typiquement en argent) directement sur le cœur de la fibre. Il faut donc au préalable enlever la gaine optique de la fibre 20 puis réaliser un dépôt homogène tout autour de celle-ci. En outre, on est souvent confronté à des difficultés techniques d'accrochage de la couche d'argent sur la silice (dont est généralement fait le cœur de la fibre).

La technique la plus proche de la présente 25 invention est celle qui utilise les réseaux de Bragg à longue période ou LPFG. Toutefois, les deux types de réseaux sont très différents. Si tous deux réalisent un couplage vers les modes de gaine d'un guide d'onde, les 30 réseaux à traits inclinés réalisent un couplage contradirectif, lié à des périodes de réseau bien inférieures à celles des LPFG.

En outre, au lieu d'analyser une seule résonance, la présente invention utilise l'ensemble des résonances que présente le spectre en transmission des réseaux à traits inclinés.

5 Par ailleurs, ces derniers sont nettement moins sensibles à d'autres paramètres physiques du milieu extérieur tels que la température et les contraintes. Ceci permet d'éviter d'avoir recours à des techniques de compensation.

10 En outre, ils occupent une plage spectrale moins importante, ce qui améliore les capacités de multiplexage du système de mesure.

15 Enfin, les longueurs des réseaux à traits inclinés sont inférieures à celles des réseaux à longue période : elles sont de l'ordre de quelques millimètres contre 20 à 30 mm pour les LPFG. Cela permet de faire des mesures quasi-ponctuelles.

20 De préférence, les moyens d'acquisition et d'analyse spectrale utilisés dans l'invention sont prévus pour acquérir chaque spectre, avec un pas de longueur d'onde aussi petit que le permet la technique d'analyse mentionnée plus haut.

25 De plus, l'invention peut être mise en œuvre avec d'autres guides d'onde que les fibres optiques, par exemple avec un ou une pluralité de guides d'onde planaires.

REVENDICATIONS

1. Système de mesure de l'indice de réfraction d'au moins un milieu (18 ; M1, M2 ... MN), ce système étant caractérisé en ce qu'il comprend :

5 un guide d'onde (14, 50) comportant au moins un transducteur (16 ; R1, R2 ... RN) formé, dans une partie du guide d'onde mise en contact avec le milieu, par un réseau de Bragg à traits inclinés dont la réponse spectrale dépend de l'indice de
10 réfraction du milieu par le biais d'un couplage énergétique entre le mode guidé et des modes de gaine et/ou un continuum de modes radiatifs,
une source de lumière (20, 28) optiquement couplée au guide d'onde pour y envoyer cette lumière et la
15 faire interagir avec le réseau,
des moyens d'analyse spectrale (22, 30, 44, 52) prévus pour analyser la lumière ayant interagi avec le réseau et fournir un spectre correspondant à ce réseau,
20 des moyens d'acquisition (24, 32, 46, 54) prévus pour récupérer ce spectre et
des moyens de traitement électronique (26, 34, 48, 56) prévus pour corréler, à partir du spectre ainsi
récupéré, la réponse spectrale du réseau à une
25 valeur de l'indice de réfraction du milieu et fournir cette valeur.

2. Système selon la revendication 1, dans lequel les moyens de traitement électronique sont prévus pour déterminer les courbes enveloppes inférieure et supérieure du spectre normalisé et l'aire normalisée comprise entre ces deux courbes.

3. Système selon l'une quelconque des revendications 1 et 2, dans lequel le guide d'onde (14)

comporte un seul réseau de Bragg à traits inclinés (16).

4. Système selon l'une quelconque des revendications 1 et 2, dans lequel le guide d'onde (50) 5 comporte une pluralité de réseaux de Bragg à traits inclinés (R1, R2 ... RN), les moyens d'analyse spectrale (52) sont prévus pour analyser la lumière ayant interagit avec les réseaux et fournir les spectres correspondant respectivement à ces réseaux, 10 les moyens d'acquisition (54) sont prévus pour démultiplexer de façon optique ou numérique les spectres ainsi fournis et discriminer les réponses spectrales respectives des réseaux et les moyens de traitement électronique (56) sont prévus pour corréler 15 la réponse spectrale de chaque réseau à la valeur de l'indice de réfraction du milieu (M1, M2 ... MN) correspondant à ce réseau.

5. Système selon l'une quelconque des revendications 1 à 4, dans lequel la source de lumière 20 (20) est une source à large spectre.

6. Système selon la revendication 3, dans lequel la source de lumière est une source à spectre étroit (28), accordable en longueur d'onde, et les moyens d'analyse spectrale comprennent un 25 photodétecteur (30).

7. Système selon l'une quelconque des revendications 1 à 6, dans lequel la source de lumière (20) est optiquement couplée à une première extrémité du guide d'onde (14) et les moyens d'analyse spectrale 30 (22, 30, 52) sont optiquement couplés à une deuxième extrémité de ce guide d'onde, en vue de faire des mesures d'indice de réfraction par transmission.

8. Système selon l'une quelconque des revendications 1 à 6, dans lequel la source de lumière (20) et les moyens d'analyse spectrale (44) sont optiquement couplés à une première extrémité du guide d'onde (14) et des moyens de réflexion de la lumière (36) sont prévus à la deuxième extrémité du guide d'onde, en vue de faire des mesures d'indice de réfraction par réflexion.

9. Système selon l'une quelconque des revendications 1 à 8, dans lequel les moyens d'acquisition et d'analyse spectrale sont prévus pour acquérir chaque spectre, avec un pas de longueur d'onde aussi petit que le permet la technique d'analyse.

10. Système selon l'une quelconque des revendications 1 à 9, dans lequel le guide d'onde est une fibre optique (14, 50).

11. Système selon l'une quelconque des revendications 1 à 9, dans lequel le guide d'onde est un guide d'onde planaire.

1/3

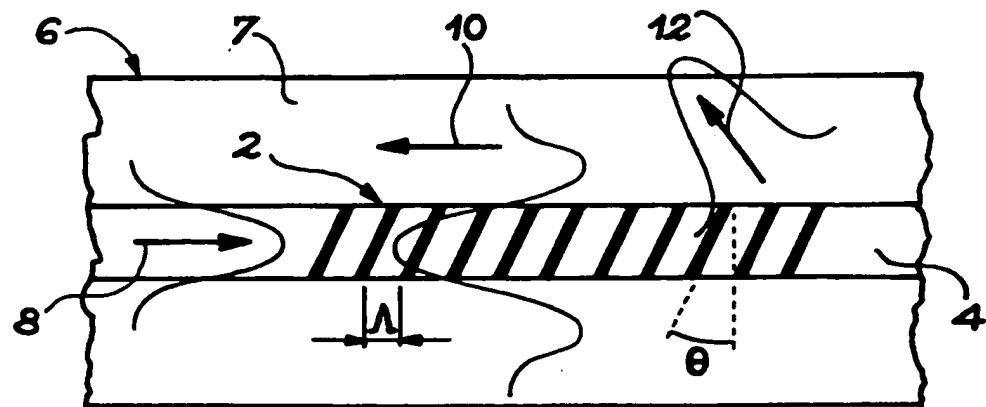


FIG. 1

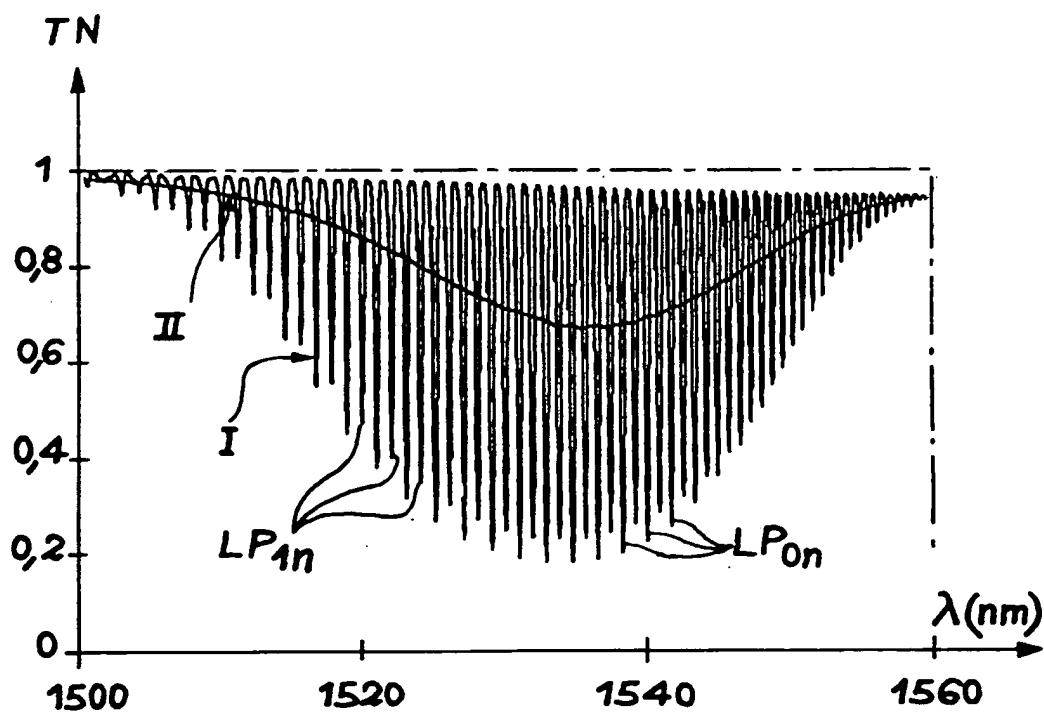


FIG. 2

2/3

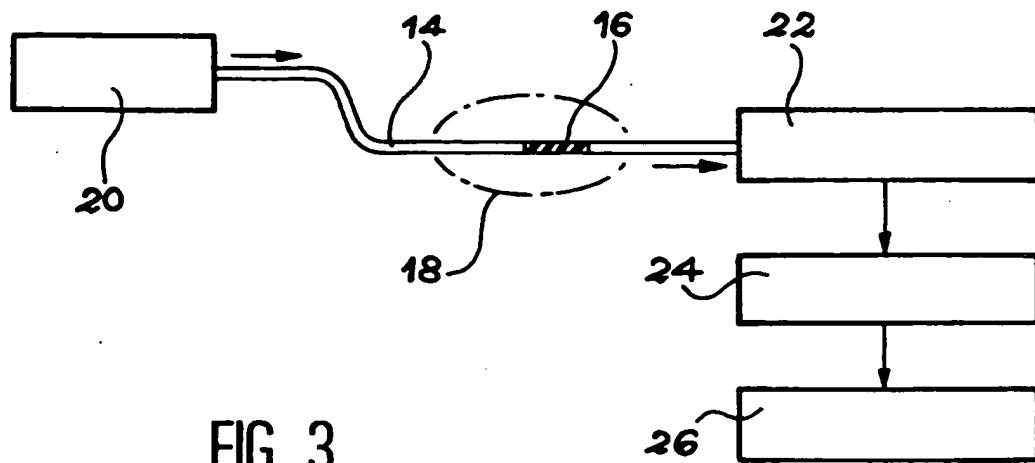


FIG. 3

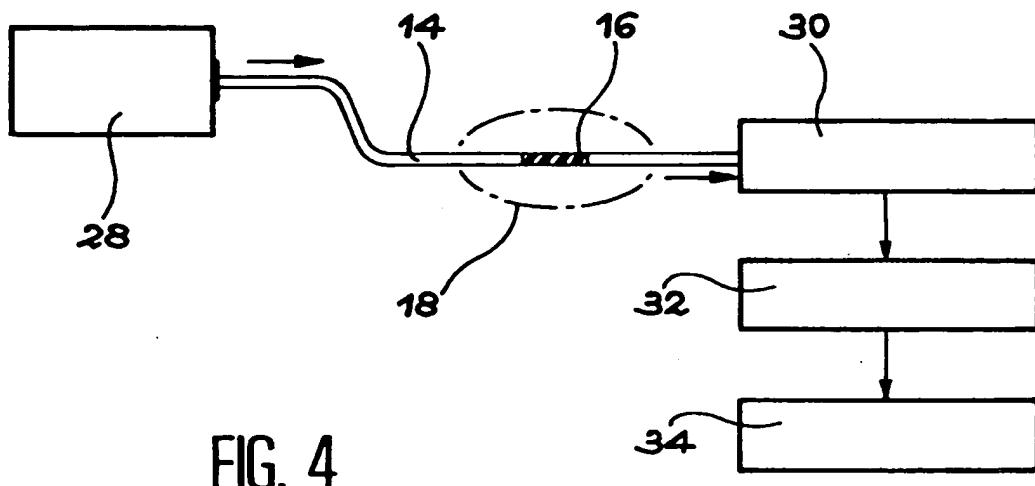


FIG. 4

3/3

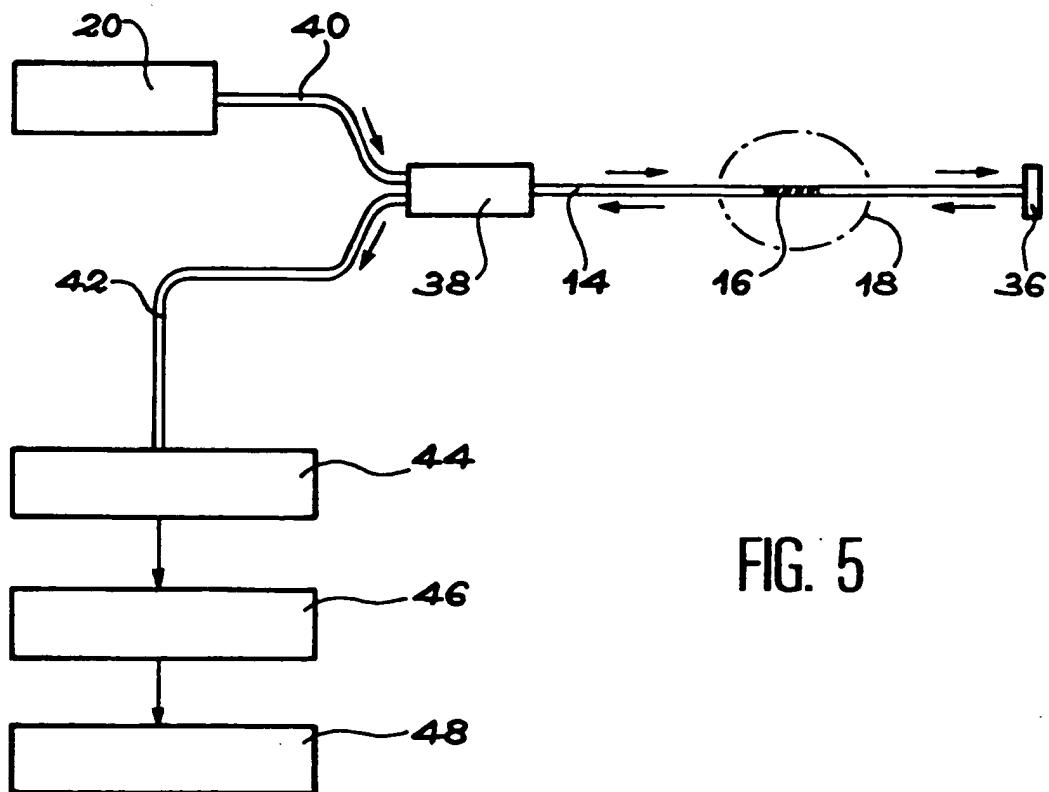


FIG. 5

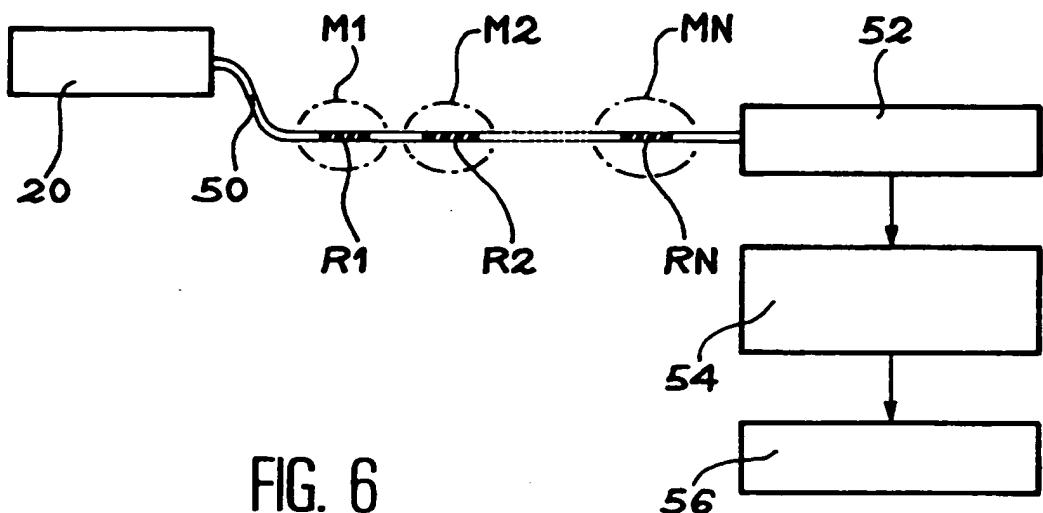


FIG. 6

RAPPORT DE RECHERCHE
PRÉLIMINAIRE

 Établi sur la base des dernières revendications
 déposées avant le commencement de la recherche

2814810

N° d'enregistrement
nationalFA 594789
FR 0012430

DOCUMENTS CONSIDÉRÉS COMME PERTINENTS		Revendication(s) concernée(s)	Classement attribué à l'invention par l'INPI
Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes		
X	US 5 380 995 A (CLARK TIMOTHY E ET AL) 10 janvier 1995 (1995-01-10)	1,5-11	601N21/41 602B5/18 602B5/20
A	* colonne 2, ligne 7 - ligne 48 * * colonne 2, ligne 1 - ligne 27; revendication 1 *	4	
X	ECKE W ET AL: "Optical fiber grating sensor network for monitoring refractive index and temperature distributions in fluids" OPTICAL DIAGNOSTICS FOR FLUIDS/HEAT/COMBUSTION AND PHOTOMECHANICS FOR SOLIDS, DENVER, CO, USA, 21-23 JULY 1999, vol. 3783, pages 176-183, XP000984344 Proceedings of the SPIE - The International Society for Optical Engineering, 1999, SPIE-Int. Soc. Opt. Eng, USA ISSN: 0277-786X * page 176 - page 177; figures 1,2 *	1,4-11	
A	BHATIA V ET AL: "COMPARISON OF OPTICAL FIBER LONG-PERIOD AND BRAGG GRATING SENSORS" PROCEEDINGS OF THE SPIE, SPIE, BELLINGHAM, VA, US, vol. 2718, 26 février 1996 (1996-02-26), pages 110-121, XP000198670 * abrégé *	1	DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHÉS (Int.CL.7) G02B G01N
A	US 5 073 024 A (VALETTE SERGE ET AL) 17 décembre 1991 (1991-12-17) * abrégé *	1	
		-/-	
2	Date d'achèvement de la recherche 14 août 2001	Examinateur Scheu, M	
CATÉGORIE DES DOCUMENTS CITÉS X : particulièrement pertinent à lui seul Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie A : antécédent technologique O : divulgation non écrite P : document intercalaire			
T : théorie ou principe à la base de l'invention E : document de brevet bénéficiant d'une date antérieure à la date de dépôt et qui n'a été publié qu'à cette date de dépôt ou qu'à une date postérieure. D : cité dans la demande L : cité pour d'autres raisons & : membre de la même famille, document correspondant			

**RAPPORT DE RECHERCHE
PRÉLIMINAIRE**

 établi sur la base des dernières revendications
déposées avant le commencement de la recherche

2814810

N° d'enregistrement
nationalFA 594789
FR 0012430

DOCUMENTS CONSIDÉRÉS COMME PERTINENTS		Revendication(s) concernée(s)	Classement attribué à l'invention par l'INPI
Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes		
E	ES 2 150 386 A (UNIV MADRID POLITECNICA) 16 novembre 2000 (2000-11-16) * le document en entier *	1,3-5,7, 10	
		DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHÉS (Int.Cl.7)	
2			
	Date d'achèvement de la recherche	Examinateur	
	14 août 2001	Scheu, M	
CATÉGORIE DES DOCUMENTS CITÉS X : particulièrement pertinent à lui seul Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie A : arrière-plan technologique O : divulgation non-écrite P : document intercalaire			
T : théorie ou principe à la base de l'invention E : document de brevet bénéficiant d'une date antérieure à la date de dépôt et qui n'a été publié qu'à cette date de dépôt ou qu'à une date postérieure. D : cité dans la demande L : cité pour d'autres raisons & : membre de la même famille, document correspondant			